

УДК 541.182+537

© Б. П. Шарфарец, 2020

ЭЛЕКТРОФОРЕЗ НА СУММАРНОМ (ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ) ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. II. ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННОГО И ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Рассмотрена гидродинамика электрофореза при одновременном воздействии постоянного и переменного электрических полей. Показано, что при совмещении постоянного и переменного внешних полей происходит перекачка энергии постоянного электрического поля в переменное гидродинамическое поле. Приведен пример дисперсной среды, в которой может возникнуть гигантская дисперсия диэлектрической проницаемости, что в свою очередь может способствовать повышению суммарной скорости электрофореза. Приведены аналогии поведения рассмотренной дисперсной среды с поведением электроакустического преобразователя, основанного на применении электрокинетических явлений.

Кл. сл.: электрофорез, электрическое поле, дисперсная частица, дисперсная среда, переменные течения, стационарные течения, уравнение Навье – Стокса

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением работы [1], написанной по материалам работ [2, 3], в которых рассмотрены эффекты образования переменных и стационарных течений при приложении переменного электрического поля к дисперсным системам. В работе [2] рассматриваются переменные и постоянные течения, вызванные поляризацией двойного электрического слоя (ДЭС), в то время как в работе [3] кроме этого рассмотрено еще два механизма, обуславливающих возникновение стационарных нелинейных течений: инерционного и электрокапиллярного (далее электрокапиллярные нелинейные течения здесь не рассматриваются, т.к. они образуются только для жидких металлических дисперсных частиц и при частотах больше 1 Гц соответствующие скорости течения становятся пренебрежимо малыми; подробнее об этих течениях см. в [3, § 3.4]).

В отличие от работы [1], здесь рассматривается электрогидродинамическая и электрохимическая задача о процессах, происходящих во внешнем электрическом поле, равном сумме постоянного и переменного полей. Ранее подобная задача рассматривалась применительно к физическому обоснованию принципа действия электроакустического преобразователя, основанного на наличии электрокинетических явлений [4–7 и др.]. Как было показано в этих работах, наличие постоянного и переменного электрических полей в силу нели-

нейности гидродинамической части задачи может приводить к появлению полезных следствий, вызванных перетеканием энергии постоянного электрического поля в переменные по времени процессы в системе*). Кроме того, здесь будет продолжено рассмотрение вопросов, связанных с гигантской дисперсией диэлектрической проницаемости дисперсной системы и ее использованием для увеличения скорости электрофореза, начатое в [9, 10].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ставится задача изучения особенностей электрофореза ионов в дисперсной среде на примере двухфазной среды, состоящей из жидкой дисперсионной проводящей однородной среды в свободном пространстве (электролита), в которую помещена дисперсная фаза в виде взвеси частиц шаровой формы, в случае приложения электрического поля, состоящего из суммы постоянного и гармонического полей. При этом предполагается, что наличие дисперсной фазы при определенных условиях, накладываемых на свойства дисперсной среды, может вызывать гигантскую дисперсию диэлектрической проницаемости.

*) Впрочем, это согласуется с появлением в нелинейных системах кратных частот $n\omega$, $n = 0, 2, 3, \dots$, при подаче в систему воздействия на исходной частоте ω [8, § 1.1].

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Предварительно сделаем два замечания.

Во-первых, отметим, что в случае электрофореза дисперсных частиц (ионов) в условиях наличия вокруг них двойного слоя для определения скорости электрофореза используется формула Смолуховского [11, с. 39]

$$\mathbf{U}_{ef} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} \mathbf{E}. \quad (1)$$

Здесь \mathbf{U}_{ef} — вектор скорости электрофореза частицы (иона); ε_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость рассматриваемой гетерогенной системы (дисперсной среды); η — динамическая вязкость дисперсионной фазы; \mathbf{E} — вектор напряженности приложенного электрического поля. Применение для определения скорости электрофореза выражения $\mathbf{U}_Q = Q\mathbf{E}$, где Q — заряд иона, неправомерно в случае наличия вокруг него двойного слоя (см. подробнее [11, § 2.3, 2.4]).

Во-вторых, после перехода к системе отсчета, в которой дисперсная частица (ион) покоится, а жидкость на бесконечности движется со скоростью $-\mathbf{U}_{ef} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} \mathbf{E} = \mathbf{U}_{co}$, можно свести задачу об электрофорезе к электроосмотической задаче [12, с. 474]. Поэтому электрофоретическая задача может рассматриваться в электроосмотической постановке.

В качестве математической модели соответствующего электроосмотического процесса принимаем систему уравнений электрогидродинамики, представленную в работе [1, (7)–(11)] (см. также работы [13–15]) с тем исключением, что уравнение [1, (7)] записывается с учетом нелинейного члена в следующем виде:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}_\Sigma}{\partial t} + (\mathbf{v}_\Sigma \cdot \nabla) \mathbf{v}_\Sigma \right) = -\nabla p_\Sigma + \eta \Delta \mathbf{v}_\Sigma + \rho_{el} \mathbf{E}_\Sigma. \quad (2)$$

В (2) учтено внешнее электрическое поле напряженностью $\mathbf{E}_\Sigma = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}$, где постоянное электрическое поле $\mathbf{E}_0 = \text{const}$ модулируется коллинеарным ему электрическим вектором \mathbf{E} , зависящим от времени, ($\mathbf{E} \times \mathbf{E}_0 = 0$). В (2) η — динамическая вязкость, p_Σ — давление, \mathbf{v}_Σ — вектор скорости в среде, ρ_0 — плотность среды. Величины, помеченные индексом Σ , возбуждены полем \mathbf{E}_Σ . Пометим поля, вызванные электрическим полем \mathbf{E}_0 , нижним индексом 0: ρ_0, \mathbf{v}_0 . Через \mathbf{v}, p обозна-

чим добавки к полям ρ_0, \mathbf{v}_0 после добавления к полю \mathbf{E}_0 поля \mathbf{E} . Через ρ_{el} обозначаем плотность электрического заряда в дисперсной среде.

Далее полагаем, что течение, описываемое (2), ламинарное. Выражение (2) в стационарном случае ($\mathbf{E} \equiv 0$) запишется так:

$$\rho_0 (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 = -\nabla p_0 + \eta \Delta \mathbf{v}_0 + \rho_{el} \mathbf{E}_0. \quad (3)$$

В случае пренебрежения нелинейным членом (3) и постоянстве давления $\nabla p_0 = 0$ приходим к классическому уравнению для электроосмотического движения жидкости [11, с. 33].

Вычитая уравнение (3) из (2), получаем уравнение движения для гармонических полей:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \\ = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho_{el} \mathbf{E} - (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}_0). \end{aligned} \quad (4)$$

В случае возможности пренебрежения нелинейным членом в уравнении (4) оно приводится к линейному виду.

Как видно из (3), (4), в случае электрофореза на смеси постоянного и переменного электрических полей в уравнении движения переменных полей (4) возникает объемная сила $-(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}_0)$, связанная с перекачкой энергии из стационарного поля. Аналогичный формализм возникал ранее в работах [7, 16], посвященных электроакустическому преобразованию, основанному на электроосмотических явлениях. Как показано в [7, 16], перекачка энергии постоянного электрического поля в переменное поле может достигать значительных величин (по результатам проведенных экспериментов рост амплитуд переменных полей менялся от частоты и достигал 29 дБ).

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена гидродинамика электрофореза при одновременном воздействии постоянного и переменного электрических полей. Кроме того, в работе показано, что при совмещении постоянного и переменного внешних полей происходит перекачка энергии постоянного электрического поля в переменное гидродинамическое поле. Отмечено, что гидродинамика электрофореза на суммарном (переменном и постоянном) электрическом поле практически совпадает с гидродинамикой электроакустического преобразования с применением электрокинетических явлений. Рассмотренный пример дисперсной среды, в кото-

рой может возникнуть гигантская дисперсия диэлектрической проницаемости, что в свою очередь может способствовать повышению суммарной скорости электрофореза, является частным. Проведенные рассуждения могут быть распространены и на более сложные дисперсные системы

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-20-00 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е. Электрофорез на суммарном постоянном и переменном электрических полях. I. Переменное электрическое поле, критический обзор состояния вопроса // Научное приборостроение. 2020. Т. 30, № 3. С. 9–18. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2020/abst3.php#abst2>
2. Мурцовкин В.А. Нелинейные течения вблизи поляризованных дисперсных частиц // Коллоид. ж. 1996. Т. 58, № 3. С. 358–367.
3. Мурцовкин В.А. Электрогидродинамические эффекты в поверхностных явлениях. Дис. ... док-ра физ.-мат. наук. М.: Инст. физ. химии, 1992. 300 с.
4. Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Шарфарец Б.П., Гуляев Ю.В. Теоретическое обоснование нового метода электроакустического преобразования. Линейное приближение // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 483, № 3. С. 265–268.
5. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. I. Гидродинамический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 25–35. URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst2.php#abst4>
6. Сергеев В.А., Шарфарец Б.П. Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. II. Акустический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 36–44. URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst2.php#abst5>
7. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Гуляев Ю.В. О методе электроакустического преобразования, основанном на электрокинетических явлениях // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 4. С. 453–462.
8. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975. 288 с.
9. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е. О возможности использования гигантской дисперсии диэлектрической проницаемости дисперсной системы для увеличения скорости электрофореза дисперсных частиц // Научное приборостроение. 2020. Т. 30, № 3. С. 38–44. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2020/abst3.php#abst5>
10. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е. Гигантская дисперсия диэлектрической проницаемости дисперсной системы в переменном электрическом поле. Обзор подходов, учитывающих наличие двойного слоя // Научное приборостроение. 2020. Т. 30, № 4. С. 33–46.
11. Духин С.С., Дерягин Б.В. Электрофорез. М.: Наука, 1976. 328 с.
12. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: ГИФМЛ, 1959. 700 с.
13. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектrolитах. Киев: Наукова думка, 1972. 207 с.
14. Шарфарец Б.П. Применение системы уравнений электрогидродинамики для математического моделирования нового способа электроакустического преобразования // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 4. С. 127–134. URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst4.php#abst21>
15. Шарфарец Б.П. Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 1. С. 135–142. URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst1.php#abst20>
16. Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Дмитриев С.П., Телятник С.Г. Об электроакустическом преобразователе, основанном на использовании электрокинетических явлений // Труды всероссийской акустической конференции. СПб.: Политехпресс, 2020. С. 445–450.

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург**

Контакты: Шарфарец Борис Пинкусович,
sharb@mail.ru

Материал поступил в редакцию 22.09.2020

ELECTROPHORESIS IN THE TOTAL (CONSTANT AND ALTERNATING) ELECTRIC FIELD.

II. PECULIARITIES OF THE COMBINED IMPACT OF ALTERNATING AND CONSTANT ELECTRIC FIELDS

B. P. Sharfarets

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The hydrodynamics of electrophoresis under the simultaneous impact of constant and alternating electric fields is considered. It has been shown that when the constant and alternating external fields are combined, the energy of the constant electric field is transferred into the alternating hydrodynamic field. An example is given of a dispersed medium in which a giant dispersion of the dielectric constant can arise, which in turn can contribute to an increase in the total electrophoresis rate. Analogies of the behavior of the considered dispersed medium with the action of an electroacoustic transducer based on the use of electrokinetic phenomena are given.

Keywords: electrophoresis, electric field, dispersed particle, dispersed environment, variable flows, stationary flows, the Navier – Stokes equation

INTRODUCTION

This work is a continuation of work [1], based on the materials of works [2, 3], in which the effects of the formation of alternating and stationary flows are considered in terms of affecting disperse systems by an alternating electric field. In [2], alternating and constant flows caused by the polarization of an electric double layer (EDL) are considered, while in [3], also two more mechanisms were considered, that ones cause the occurrence of stationary nonlinear flows: inertial and electrocapillary (further, electrocapillary nonlinear flows are not considered here, since they are formed only for liquid metal dispersed particles and at frequencies greater than 1 Hz, the corresponding flow velocities become negligible; for more details on these flows, see [3, Section 3.4]).

Unlike work [1], here the electrohydrodynamic and electrochemical problem of the processes occurring in an external electric field equal to the sum of a constant and an alternating fields. Earlier, a similar problem was considered in relation to the physical substantiation of the principle of operation of an electroacoustic transducer based on the presence of electrokinetic phenomena [4–7, etc.]. As was shown in these works, the presence of constant and alternating electric fields, due to the nonlinearity of the hydrodynamic part of the problem, can lead to the appearance of useful consequences caused by the overflow of the energy of the constant electric field into time-varying processes

in the system^{*)}. In addition, here we will continue to consider issues related to the giant dispersion of the dielectric constant of a disperse system and its use to increase the rate of electrophoresis, started in [9, 10].

FORMULATION OF THE PROBLEM

The posed problem is to study the peculiarities of ion electrophoresis in a dispersed medium using the example of a two-phase medium consisting of a liquid dispersive conducting homogeneous medium in free space (electrolyte), in which a dispersed phase is placed in the form of a suspension of spherical particles, in the case of applying an electric field consisting of a constant and harmonic fields. It is assumed that the presence of a dispersed phase, under certain conditions imposed on the properties of a dispersed medium, can cause a giant dispersion of the dielectric constant.

SOLUTION

Let's make two preliminary remarks.

First, we note that in the case of electrophoresis of dispersed particles (ions) in the presence of a double layer around them, the Smoluchowski formula is used to determine the electrophoresis rate [11, p. 39]

^{*)} However, this is consistent with the appearance in nonlinear systems of multiple frequencies $n\omega$, $n = 0, 2, 3, \dots$, when affecting the system at the initial frequency ω [8, § 1.1].

$$\mathbf{U}_{\text{ef}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} \mathbf{E}. \quad (1)$$

Here \mathbf{U}_{ef} is the velocity vector of the particle (ion) electrophoresis; ε_0 — electric constant; ε — the relative dielectric constant of the considered heterogeneous system (dispersed medium); η — dynamic viscosity of the dispersion phase; \mathbf{E} — vector of the applied electric field. The use of the expression $\mathbf{U}_Q = Q\mathbf{E}$, where Q is the charge of an ion, to determine the rate of electrophoresis, is inappropriate if there is a double layer around it (see for more details [11, § 2.3, 2.4]).

Secondly, after switching to the frame of reference, in which a dispersed particle (ion) is at rest, and the liquid at infinity moves with speed $-\mathbf{U}_{\text{ef}} = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon \zeta}{\eta} \mathbf{E} = \mathbf{U}_{\text{eo}}$, one can reduce the task of electrophoresis to an electroosmotic task [12, p. 474]. Therefore, the electrophoretic task can be considered in electroosmotic terms.

As a mathematical model of the corresponding electroosmotic process, we accept the system of equations of electrohydrodynamics presented in [1, (7)–(11)] (see also [13–15]) with the exception that the equation [1, (7)] means taking into account the nonlinear term in the following form:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}_\Sigma}{\partial t} + (\mathbf{v}_\Sigma \cdot \nabla) \mathbf{v}_\Sigma \right) = -\nabla p_\Sigma + \eta \Delta \mathbf{v}_\Sigma + \rho_{\text{el}} \mathbf{E}_\Sigma. \quad (2)$$

In (2), an external electric field of strength $\mathbf{E}_\Sigma = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}$ is taken into account, where the constant electric field $\mathbf{E}_0 = \text{const}$ is modulated by a collinear electric vector \mathbf{E} , that depends on time, ($\mathbf{E} \times \mathbf{E}_0 = 0$). In (2) η — dynamic viscosity, p_Σ — pressure, \mathbf{v}_Σ — velocity vector in the medium, ρ_0 — the density of the medium. The values marked with the index Σ , are excited by the field \mathbf{E}_Σ . Let us mark the fields caused by the electric field \mathbf{E}_0 , with the subscript 0: p_0 , \mathbf{v}_0 . Also we mark the additions to the fields p_0 , \mathbf{v}_0 as p , \mathbf{v} , after adding the field \mathbf{E} to the field \mathbf{E}_0 . The density of electric charge in a dispersed medium is marked as ρ_{el} .

Further, we assume that the flow described by (2) is laminar. Expression (2) in the stationary case ($\mathbf{E} \equiv 0$) is written as follows:

$$\rho_0 (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 = -\nabla p_0 + \eta \Delta \mathbf{v}_0 + \rho_{\text{el}} \mathbf{E}_0. \quad (3)$$

In the case of constancy of pressure $\nabla p_0 = 0$ and neglecting the nonlinear term (3), we come to the classical equation for electroosmotic flow of liquid [11, p. 33].

Subtracting equation (3) from (2), we obtain the equation of motion for harmonic fields:

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \\ = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \rho_{\text{el}} \mathbf{E} - (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}_0). \end{aligned} \quad (4)$$

In the case of the possibility of neglecting the nonlinear term in equation (4), it comes to linear form.

As can be seen from (3), (4), in the case of electrophoresis on a mixture of constant and alternating electric fields (4), a volume force $-(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}_0)$ arises in the equation of motion of alternating fields (4) and that is associated with the transfer of energy from the stationary field.

A similar formalism appeared earlier in the works [7, 16] devoted to electroacoustic conversion based on electro-osmotic phenomena. As has been shown in [7, 16], the transfer of energy of constant electric field into alternating field can reach significant values (according to the results of the experiments, the increase in the amplitudes of alternating fields varied with frequency and reached 29 dB).

CONCLUSIONS

The paper considers the hydrodynamics of electrophoresis under the simultaneous impact of constant and alternating electric fields. In addition, it is shown in the paper that when the constant and alternating external fields are combined, the energy of the constant electric field is transferred into the alternating hydrodynamic field. It is noted that the hydrodynamics of electrophoresis on the total (alternating and constant) electric field practically coincides with the hydrodynamics of electroacoustic conversion with the use of electrokinetic phenomena. The considered example of a dispersed medium, in which a giant dispersion of the dielectric constant can arise, which in turn can contribute to an increase in the total rate of electrophoresis, is particular. The above reasoning can be extended to more complex disperse systems.

The work was carried out at the Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences within the framework of State Assignment 075-00780-20-00 on topic No. 0074-2019-0013 of the Ministry of Science and Higher Education.

REFERENCES

1. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E. [Electrophoresis on the total constant and harmonic electric field. I. Harmonic electric field, a review of the state of the issue]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020, vol. 30, no. 3, pp. 9–18. DOI: 10.18358/np-30-3-i918 (In Russ.).
2. Murtsovkin V.A. [Nonlinear currents near polarized particulate matter]. *Kolloidnyj zhurnal* [Colloid Journal], 1996, vol. 58, no. 3, pp. 358–367. (In Russ.).
3. Murtsovkin V.A. *Elektrogidrodinamicheskie efekty v po-verhnostnyh yavleniyah*. Dis. dok. fiz.-mat. nauk [Electrohydrodynamic effects in surface phenomena. Cand. of the degree of doc. phys.-math. sci. diss.]. Moscow, Institute of Physical chemistry and Electrochemistry Russian academy of sciences, 1992. 300 p. (In Russ.).
4. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyaev Yu.V. [Theoretical justification of the new electroacoustic conversion method. Linear approximation]. *Doklady Akademii Nauk* [Reports of Academy of Sciences], 2018, vol. 483, no. 3, pp. 265–268. (In Russ.).
5. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part I. The hydrodynamic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 25–35. DOI: 10.18358/np-28-2-i2535 (In Russ.).
6. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part II. The acoustic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 36–44. DOI: 10.18358/np-28-2-i3644 (In Russ.).
7. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Gulyaev Yu.V. [On electroacoustic transformation method based on electrokinetic phenomena]. *Akusticheskij zhurnal* [Acoustic journal], 2020, vol. 66, no. 4, pp. 453–462. DOI: 10.1134/S1063771020030057 (In Russ.).
8. Rudenko O.V., Soluyan S.I. *Teoreticheskie osnovy nelinejnoj akustiki* [Theoretical foundations of nonlinear acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 288 p. (In Russ.).
9. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E. [On the attempt to use the giant dispersion of the dielectric constant of a disperse system to increase the speed of electrophoresis of dispersed particles]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020, vol. 30, no. 3, pp. 38–44. DOI: 10.18358/np-30-3-i3844 (In Russ.).
10. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E. [Giant dispersion of dielectric permeability of the disperse system in an alternating electric field. Overview of approaches taking into account presence of a double layer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2020. Vol. 30, no. 4. (In Russ.).
11. Duhin S.S., Deryagin B.V. *Elektroforez* [Electrophoresis]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 328 p. (In Russ.).
12. Levich V.G. *Fiziko-himicheskaya gidrodinamika* [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow, GIFML Publ., 1959. 700 p. (In Russ.).
13. Duhin S.S., Shilov V.N. *Dielektricheskie yavleniya i dvojnnoj sloj v dispersnyh sistemah i polielektrolitah* [Dielectric phenomena and double layer in disperse systems and polyelectrolytes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1972. 207 p. (In Russ.).
14. Sharfarets B.P. [Application of the system of electrohydrodynamics equations for mathematical modeling of a new method of electro-acoustic transformation]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 127–134. DOI: 10.18358/np-28-4-i127134 (In Russ.).
15. Sharfarets B.P. [System electrohydrodynamics equations applied to electroosmotic processes]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 135–142. DOI: 10.18358/np-29-1-i135142 (In Russ.).
16. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Dmitriev S.P., Telyatnik S.G. [About electroacoustic transducer based on the use of electrokinetic phenomena]. *Trudy vserossiyskoy akusticheskoy konferencii* [Proceedings of the All-Russian Acoustic Conference]. Saint-Petersburg, Politekhpress, 2020, pp. 445–450. (In Russ.).

Contacts: *Sharfarets Boris Pinkusovich*,
sharb@mail.ru

Article received by the editorial office on 22.09.2020